

Herschel,

lumières sur les mondes enfouis de l'Univers

Vincent Minier (vincent.minier@cea.fr)
Laboratoire AIM, Irfu, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

L'observatoire spatial Herschel doit son nom au physicien britannique William Herschel (1738-1822), découvreur du rayonnement infrarouge du Soleil. Herschel est désormais le nom du plus grand télescope spatial jamais conçu. Cet observatoire servira pendant quatre ans l'astronomie dans l'infrarouge et le submillimétrique.

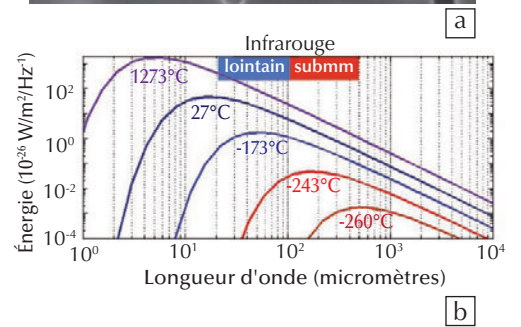
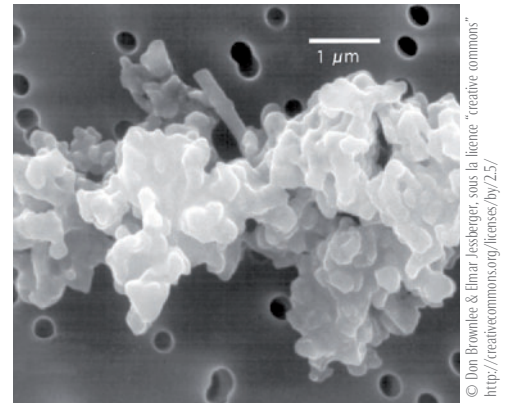
Lancé le 14 mai 2009 par Ariane 5, le satellite est maintenant en orbite autour du second point de Lagrange à 1,5 millions de km de la Terre. Sa mission commence : résoudre les mystères de la formation des étoiles et de l'évolution des galaxies.

William Herschel, reconnu pour la découverte de la planète Uranus, découvre la lumière infrarouge en 1800, en constatant une élévation de température sur un thermomètre placé en deçà de la couleur rouge d'un spectre prismatique de lumière. L'Agence spatiale européenne (ESA) a dédié son nouvel observatoire spatial à ce grand physicien, mais également à sa sœur Caroline, qui fut aussi une brillante astronome.

Le télescope Herschel est le fruit d'une collaboration entre 30 instituts de 15 pays. Il effectuera une cartographie et une étude spectroscopique des régions très froides de l'Univers, observé dans le domaine de l'infrarouge lointain et du submillimétrique, soit de 60 à 600 μm en longueur d'onde (5 à 50 K en température). En finesse de résolution spatiale, Herschel offre des performances très supérieures à celles de son prédécesseur européen ISO et du télescope spatial américain Spitzer ; son domaine d'observation est plus étendu vers les grandes longueurs d'onde (les basses températures) que ceux de ces instruments, tous deux limités à 200 μm .

Les bolomètres à la recherche des grains de poussière de l'Univers

Herschel (fig. 2) est équipé d'un télescope, d'un cryostat et de trois instruments. Deux « spectro-imageurs », PACS et SPIRE, permettent de réaliser des cartographies du ciel avec une très grande sensibilité, ainsi que des analyses spectroscopiques. Un troisième instrument, HIFI, est dédié aux études spectroscopiques à très haute résolution spectrale, dont principalement celles de la vapeur d'eau. Les « imageurs » de PACS et SPIRE seront sensibles aux régions très froides ($< 50 \text{ K}$) des galaxies. Ce sont, par exemple, des condensations de gaz et de poussières dans lesquelles se formeront les étoiles. Les grains de poussière interagissent fortement avec la lumière. Ils l'absorbent et la diffusent très efficacement, comme



- (a) Image au microscope électronique d'un agrégat de grains de poussière interplanétaires. Chaque grain a une taille de moins d'un micromètre.
- (b) Énergie émise par un corps noir en fonction de la température. Dans le milieu interstellaire, les grains de poussière absorbent le rayonnement et le rediffusent dans l'infrarouge. Plus le grain est froid, plus le maximum de l'énergie qu'il rediffuse se décale vers l'infrarouge submillimétrique.

une petite quantité de fumée qui peut rendre une salle très sombre. Ils sont très froids et rayonnent l'énergie absorbée dans l'infrarouge et le submillimétrique (fig. 1). Ce sont ces propriétés de la poussière du milieu interstellaire qu'Herschel va utiliser pour cartographier et dévoiler les mondes enfouis de l'Univers.

Pour cartographier la poussière de l'Univers, les imageurs d'Herschel utilisent des détecteurs bolométriques. Le CEA a conçu ceux de PACS et a également réalisé l'électronique et les réfrigérateurs cryogéniques pour SPIRE et PACS.

© Don Brownlee & Einar Jessberger, sous la licence "creative commons" <http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/>

Un bolomètre est un détecteur très sensible de rayonnement qui est particulièrement adapté pour les basses énergies, là où le photon ne peut produire d'effet photovoltaïque. L'énergie incidente sur le détecteur est absorbée, ce qui entraîne un échauffement du bolomètre et une modification de sa résistance électrique. Une batterie et une résistance de charge, montées en série avec le bolomètre, sont alors utilisées pour convertir ce changement de résistance en un changement de potentiel électrique. De sa mesure après plusieurs étalonnages, on remonte à la puissance incidente de l'astre ou du phénomène physique observé.

Sur PACS, chaque détecteur ou bolomètre est un pixel, comme sur un appareil photo numérique. L'innovation technologique est d'avoir réussi à agencer les bolomètres sous forme de matrices de pixels : une première dans ce domaine spectral, qui permet un échantillonnage complet du ciel observé. PACS possède deux plans focaux pour l'imagerie, composés respectivement de 2048 pixels et 512 pixels, pour des observations entre 60 et 200 μm . Chaque pixel a



Le bestiaire des mondes enfouis de l'Univers qu'Herschel dévoilera. Au premier plan, des amas d'étoiles naissent après une période de gestation dans les zones noires et opaques des nuages moléculaires. À l'arrière-plan, de nombreuses galaxies vivent les mêmes scènes de naissance d'étoiles.

une surface de moins de 1 mm^2 . Les bolomètres sont refroidis à 0,3 K, soit $-272,85^\circ\text{C}$, pour minimiser les contributions de rayonnement parasite produites par les instruments eux-mêmes, et pour optimiser la réponse électrique des détecteurs à la variation de température induite par la variation de puissance incidente. 100 watts à la distance de la Lune sont ainsi détectables !

Du lancement aux premiers photons sur la caméra de bolomètres PACS

Herschel a été lancé par Ariane 5, le 14 mai 2009 à 15 h 12 (heure de Paris). Le 22 mai, les instruments à bord du satellite ont été mis sous tension. Le 9 juin, la température de fonctionnement des bolomètres a été atteinte grâce à un réfrigérateur cryogénique conçu au CEA. Le 14 juin, l'ouverture de la fenêtre du cryostat par laquelle entre la lumière collectée par le miroir d'Herschel, a été commandée à une distance de plus d'un million de kilomètres. Les premiers photons ont pu ainsi commencer à tomber sur les détecteurs.

Le premier regard d'Herschel avec la caméra PACS s'est porté sur la galaxie Messier 51 ou galaxie du Tourbillon (fig. d, p.16). Cette avant-première a été réalisée le 14 juin 2009. L'émission collectée

provient de nuages de poussière interstellaire chauffée par les nombreuses régions de formation stellaire et les amas d'étoiles massives présents dans les bras spiraux ainsi qu'au cœur de la galaxie. Cette image a été possible alors qu'aucun des systèmes utilisés n'était proprement étalonné. Elle augure bien des performances réelles d'Herschel.

Les phases de vérification des instruments et des modes d'observations ont suivi pendant l'été 2009. L'observatoire spatial Herschel a désormais débuté sa mission scientifique. Quelques résultats préliminaires, obtenus par les trois instruments, sont présentés ci-dessous.

25 ans de vision, de persuasion et de travail se sont ainsi écoulés entre la première idée d'un télescope spatial pour l'infrarouge submillimétrique et les premières observations. Place aux découvertes !

Missions et premiers résultats du télescope spatial Herschel

Résoudre le mystère de la formation des étoiles

Une des missions principales d'Herschel est la mesure, sans ambiguïté, de la quantité d'étoiles qui se forment dans l'Univers à un instant donné de son histoire. Parce que les étoiles naissent enfouies dans des cocons

>>>

2. Vue du télescope et du cryostat au sein d'Herschel. Le miroir principal du télescope, de 3,5 m de diamètre (près de 4 fois plus que tous les télescopes infrarouges précédents), est en carbure de silicium et pèse 250 kg, contre 3 t s'il avait été réalisé en verre. Le miroir collecte la lumière, qui est ensuite réfléchi par sa surface aluminisée, de 350 nm d'épaisseur avec une rugosité inférieure à 30 nm, sur un second miroir. Ce second miroir, maintenu par 4 pieds, renvoie la lumière dans l'ouverture circulaire au centre du grand miroir. La lumière termine son voyage sur les détecteurs. Le cryostat est une bombonne de 2500 litres d'hélium liquide, qui permettra de refroidir les instruments jusqu'à -271°C . Les trois instruments d'Herschel sont situés sur la partie supérieure du cryostat. L'ouverture au-dessus du cryostat correspond à celle vue au centre du miroir. C'est par cette ouverture que la lumière collectée tombe sur les détecteurs.



>>>

opaques de gaz et de poussière (fig. 3) qui absorbent la lumière visible et rayonnent essentiellement dans l'infrarouge, elle sont totalement invisibles pendant leur gestation. Les détecteurs de lumière infrarouge d'Herschel vont sonder ces mondes enfouis qu'on ne voit pas en lumière visible avec le télescope Hubble et dont l'observation reste bloquée par l'atmosphère terrestre (voir encadré, p.16).

Dans la Voie lactée, Herschel prépare une véritable étude démographique des populations d'étoiles, de la gestation à la naissance, en tentant de répondre à la question suivante : quand et comment se détermine la masse d'une étoile ? En y répondant, Herschel tranchera entre deux modèles expliquant la répartition des masses stellaires dans un amas d'étoiles.

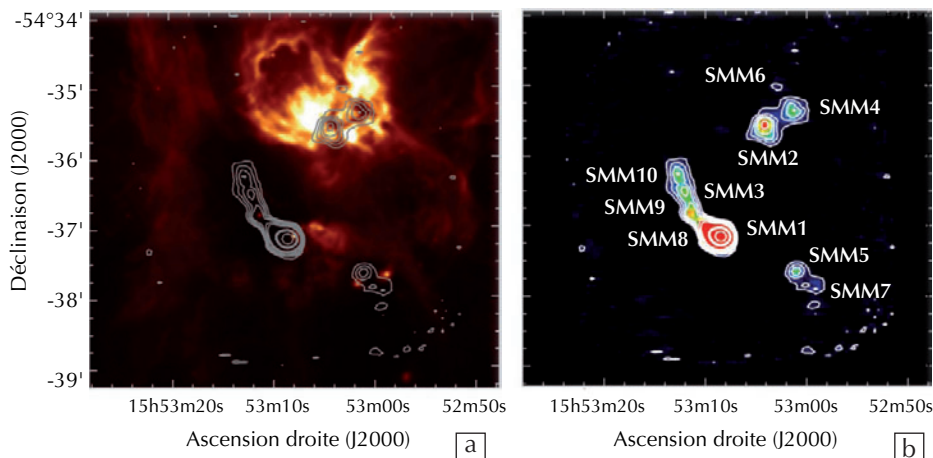
Dans le premier modèle, la masse de chaque étoile est *innée*. Les nuages moléculaires se fragmentent en un certain nombre de condensations préstellaires, qui se libèrent de leur environnement turbulent. Celles-ci s'effondrent sur elles-mêmes pour donner chacune naissance à une proto-étoile. La

masse de chaque étoile formée dépend donc directement de celle de la condensation préstellaire qui l'a engendrée. Dans ce cas, la répartition des masses stellaires dans la population résulte du processus de fragmentation du nuage au stade préstellaire. La masse des étoiles est donc déterminée avant l'effondrement des condensations individuelles.

Dans le second modèle, la masse de l'étoile est *acquise*, et quasiment indépendante de celle du cœur préstellaire initial produit par fragmentation. Chaque proto-étoile issue d'une condensation préstellaire se déplace à l'intérieur du nuage parent, et accumule progressivement de la masse en « balayant » et en attirant une plus ou moins grande quantité de la matière qu'elle traverse. Or plus une étoile est grosse, plus elle attire de matière au détriment des plus petits objets. Dans ces conditions, des objets de tailles initialement comparables vont peu à peu se différencier. Les astronomes appellent ce phénomène l'« accretion compétitive ». Dans ce modèle, la répartition des individus en fonction de leur masse n'est déterminée qu'après le stade préstellaire,

c'est-à-dire après l'effondrement des condensations en proto-étoiles.

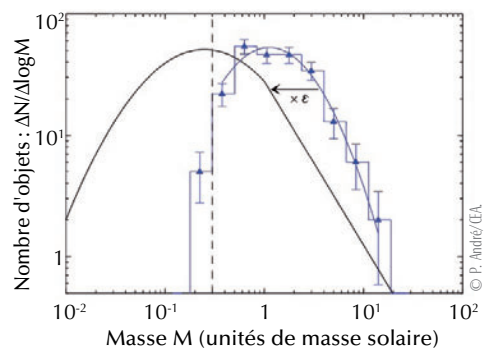
Herschel part donc à la recherche des fragments de nuages moléculaires susceptibles de s'effondrer pour former une étoile ou un amas d'étoiles. À partir de la mesure de leur luminosité, les astronomes déduiront la répartition des masses des fragments préstellaires. Ils construiront ainsi des courbes démographiques représentant la répartition des condensations préstellaires et des embryons d'étoiles. En comparant ces courbes à celles constatées dans les populations d'étoiles déjà nées de notre Galaxie, les astronomes pourront conclure sur l'origine de la masse des astres : innée (si les courbes sont comparables) ou acquise (si elles sont différentes). Les mesures, à partir d'observations au sol dans le domaine millimétrique accessible confortent le premier scénario (fig. 4) pour les embryons de soleils. Pour les très petites et les grandes étoiles, aucune réponse consensuelle n'existe à ce jour. Grâce à sa sensibilité inégalée, Herschel peut travailler dans une « gamme » comprise entre un



3. Une région où se forment des étoiles massives dans la Voie Lactée, à 6000 années-lumière de la Terre : G327.3-0.6.

Gauche : L'émission des grains de poussière du nuage moléculaire vue par le télescope spatial Spitzer dans l'infrarouge proche (~ 8 μm). Les étoiles naissent dans un nuage moléculaire où le gaz et la poussière décrivent des structures filamenteuses. La zone la plus brillante est très chaude (100 à 1000°C). Les poussières sont chauffées par l'intense rayonnement UV des étoiles massives encore enfouies dans leur cocon de gaz. En dessous, on peut distinguer une zone plus sombre. Elle n'est pas vide, mais contient des poussières beaucoup plus froides (10 K ou -260°C). Cette poche est un réservoir de gaz froid, une condensation de gaz et de poussière, dans laquelle naîtront de nouvelles étoiles massives. Pour les détecter, il faut se décaler vers le submillimétrique, un domaine plus sensible aux basses températures et aux faibles énergies.

Droite : La même région observée dans le domaine submillimétrique à 450 μm, le domaine dans lequel les objets les plus froids sont détectés. Ce qui est sombre sur l'image infrarouge de Spitzer (à gauche) devient brillant dans le submillimétrique. Les zones sombres dans la figure de gauche sont bien des condensations opaques de gaz et de poussière, 10 au total. Cette image fut réalisée par le même type de caméra de bolomètres que ceux de l'instrument PACS sur Herschel, mais à des longueurs d'onde accessibles depuis le sol à 5100 m d'altitude au Chili avec le télescope APEX.



4. Nombre de condensations préstellaires en fonction de leur masse.

La distribution de masse des condensations (en bleu) reproduit globalement la forme de la fonction de masse initiale estimée aujourd'hui pour les étoiles de notre Galaxie (en noir), avec un décalage d'un facteur $\epsilon \approx 25\%$ vers les grandes masses. Ce décalage signifie que toute la masse contenue dans une condensation n'est pas totalement transformée en masse stellaire.

Ce résultat suggère que les masses des étoiles de type solaire sont déterminées principalement par le processus de fragmentation du nuage moléculaire au stade préstellaire. La question reste posée pour les très petites et grandes masses stellaires.

centième et une dizaine de masses solaires. Les embryons de naines brunes libérant peu d'énergie et les étoiles massives très distantes vont ainsi tomber dans les filets d'Herschel.

Étudier le milieu interstellaire des galaxies

Herschel étudie également le milieu interstellaire des galaxies, ce gaz raréfié (100 atomes par litre) sur des volumes gigantesques (~ 100 années-lumière de long) que la nature utilise pour créer des étoiles par milliers et plus étonnamment des populations entières d'étoiles. Herschel a accès à la composition en gaz d'une galaxie à travers les raies d'émission ou d'absorption du carbone, de l'oxygène, de l'azote sous forme ionisée mais aussi, et c'est une première, à celles de la vapeur d'eau (fig. 5).

Dans une galaxie, la matière interstellaire contient également 1% (en masse) de poussière, de petites particules solides. L'influence de celles-ci, cependant, est énorme. Les grains de poussière absorbent une grande partie du rayonnement ultraviolet

des étoiles et le restituent dans l'infrarouge et le domaine submillimétrique, à beaucoup plus basse énergie (fig. 1). Ils contribuent ainsi au refroidissement des cocons où se forment les étoiles. Ils offrent aussi des surfaces où des réactions chimiques uniques peuvent se dérouler, comme la formation d'ammoniaque et de méthanol. Herschel est le premier télescope à voir toute la lumière émise par les grains à basse température jusqu'à -260 °C (fig. 6). Les astronomes pourront ainsi en déduire leur composition et leur taille, en fonction de leur position dans une galaxie et donc de l'influence des étoiles à proximité. Le cycle de vie de la poussière interstellaire et l'influence des grains sur les échanges d'énergie, seront spécifiquement étudiés dans les Nuages de Magellan, deux galaxies satellites de la nôtre.

Étudier la formation des galaxies dans l'Univers lointain

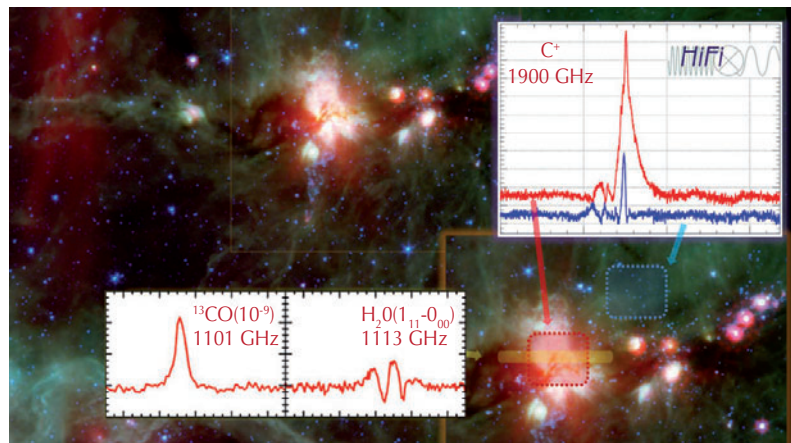
Enfin Herschel va encore plus loin. Le moteur de l'évolution des galaxies est la formation des étoiles. Pour comprendre l'origine des différents types de galaxies,

c'est l'histoire de la formation stellaire qu'il faut cerner. En mesurant comment la formation des étoiles évolue dans l'Univers à chaque époque, les astronomes obtiennent un élément essentiel qui pourra les amener à comprendre comment ont évolué les nuages de gaz primordiaux pour former les galaxies que l'on observe de nos jours dans toute leur diversité. Herschel est justement sensible à cette formation stellaire exclusivement. Herschel va ainsi sonder l'Univers lointain et plus jeune (10 milliards d'années en arrière) pour comprendre comment le taux de fabrication des étoiles au sein d'une galaxie évolue au cours du temps, en relation avec l'environnement des grandes structures de l'Univers et des trous noirs supermassifs.

>>>

Pour en savoir plus

<http://herschel.cea.fr>
<http://herschel.esac.esa.int/>



5. Spectres d'émission infrarouge mesurés le 22 juin 2009 par le spectromètre HIFI de Herschel, dans la région de formation d'étoiles massives DR 21, superposés à une image en fausses couleurs observée par le télescope spatial Spitzer. Dans l'image d'arrière-plan, le vert indique les endroits où les radiations ultraviolettes illuminent ce berceau d'étoiles naissantes. Les points bleus sont des étoiles, et les points jaunes et rouges sont des sources enfouies dans des cocons de gaz et de poussières, qui deviendront bientôt des étoiles. L'image de droite est un (léger) zoom sur la région la plus active. Les carrés bleus et rouges montrent les régions où l'émission de l'atome de carbone ionisé (C⁺) a été recherchée. Dans le graphe situé au-dessus de ce zoom, une nette différence est observée entre les spectres bleus et rouges émis par les régions correspondantes. La large raie rouge traduit la présence de matière éjectée, alors que l'étroite raie bleue évoque de la matière au repos. L'insert à gauche du zoom montre un spectre de monoxyde de carbone (à gauche) et d'eau (à droite) provenant de la position centrale de la bande jaune. Un important flot de gaz est, là aussi, visible à partir du profil de la raie de monoxyde de carbone. De plus, étant donné que cette raie est témoin d'un gaz relativement chaud (200 K), on peut en déduire que le flot contient beaucoup de matière ; il est donc très actif.



6. Visualisation par Herschel de la matière très froide de l'Univers. Cette photographie combine les images en direction de la constellation de la Croix du Sud, prises le 3 septembre 2009 par les spectromètres PACS et SPIRE de Herschel dans 5 différents filtres simultanément (à des longueurs d'onde de 70, 160, 250, 350 et 500 µm). Sur l'image, on « voit » les structures du milieu interstellaire de la Voie Lactée à travers l'émission des grains de poussière en « infrarouge submillimétrique », une lumière invisible à l'œil. Codée du rouge au bleu pour faciliter la compréhension, la lumière infrarouge submillimétrique sépare avec une très grande précision le réservoir de matière froide jusqu'à -260°C (en rouge) des zones plus chaudes à environ -220°C (en bleu). C'est dans ces nuages « moléculaires », véritables « pouponnières d'étoiles », que les embryons d'étoiles apparaissent sous forme de petits points rouges dans des filaments poussiéreux. Les nuages ont des tailles gigantesques. Cette image fait une centaine d'années-lumière de côté.

► Le défi du spatial pour s'affranchir des limites terrestres

L'atmosphère terrestre est une limitation aux observations dans l'infrarouge. La vapeur d'eau est le principal agent bloquant. Elle absorbe la lumière infrarouge venue des astres et la rediffuse dans l'atmosphère. C'est le même principe que l'effet de serre qui bloque la fuite du rayonnement infrarouge de la Terre. En limitant la quantité de lumière infrarouge, la vapeur d'eau limite la sensibilité des télescopes terrestres ; les objets célestes les moins intenses, soit peu lumineux soit très distants, sont ainsi difficilement détectables depuis le sol.

Pour s'affranchir de cette limite, les astronomes placent leurs télescopes sur des hauts plateaux désertiques et secs (par exemple, à 5000 m d'altitude dans le désert de l'Atacama au Chili) ou au-dessus de l'atmosphère en orbite. Ce second choix est plus coûteux : la taille du télescope est alors limitée par la capacité du lanceur, et sa durée de vie par la quantité d'hélium embarqué. Néanmoins, malgré ces limites, le gain en sensibilité et donc en temps d'observation dans l'espace est prodigieux, ce qui permet de cartographier de très vastes zones célestes en un temps de pose raisonnable par rapport à la durée de vie de la mission (4 ans pour Herschel). De plus, certaines fenêtres entre 60 et 200 μm sont inaccessibles depuis le sol ; or, cette gamme est essentielle dans l'estimation de la puissance lumineuse de l'objet à partir de l'intégrale de son spectre de lumière.

Herschel, lancé avec le télescope spatial Planck par une fusée Ariane 5 le 14 mai 2009 (figs a et b), est en orbite autour du point L2 de Lagrange à 1,5 millions de km de la Terre (fig. c), limitant ainsi le flux de lumière parasite venue du Soleil et de la Terre. La température de l'espace, voisine de 100 K, permet également un refroidissement passif du miroir du télescope, principale source de rayonnement infrarouge. Enfin, cela assure un bon équilibre thermique entre le cryostat et l'espace.

Le 14 juin 2009, Herschel a porté son premier regard sur une galaxie (fig. d). ■

(a) Ariane 5, le lanceur des observatoires Herschel et Planck depuis le Centre Spatial Guyanais de Kourou.

(b) Les télescopes spatiaux Herschel et Planck à l'intérieur de la coiffe d'Ariane 5. Le télescope spatial Planck étudiera le rayonnement fossile du Big Bang (voir Brève, p. 17).

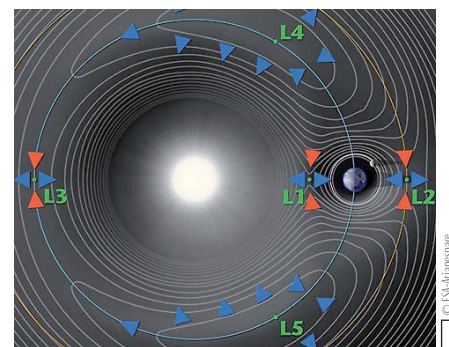
(c) Les points de Lagrange du système Terre-Soleil. Herschel est en orbite autour du point L2 qui se déplace avec la Terre autour du Soleil. Ce point d'équilibre dans le système Terre-Soleil est instable. L'orbite autour de L2 est de type Lissajous avec des amplitudes entre 500 000 et 800 000 km, ce qui place Herschel entre 1,2 et 1,8 millions de km de la Terre. Tous les 23 jours, l'orbite devient dynamiquement instable, ce qui nécessite des réajustements. Herschel possède des rétrofusées sur le module de service et de l'hydrazine comme carburant.

(d) La galaxie Messier 51 observée dans l'infrarouge lointain par le spectromètre PACS. Image composite à trois longueurs d'onde. La couleur bleue ($\lambda = 70 \mu\text{m}$) correspond à la poussière chauffée par les jeunes étoiles, les couleurs verte ($\lambda = 100 \mu\text{m}$) et rouge ($\lambda = 160 \mu\text{m}$) à la poussière plus froide. À 160 μm , l'image a une résolution améliorée d'un facteur 4 par rapport à celle obtenue avec le télescope spatial américain Spitzer à la même longueur d'onde.



© ESA/Herschel

(a)



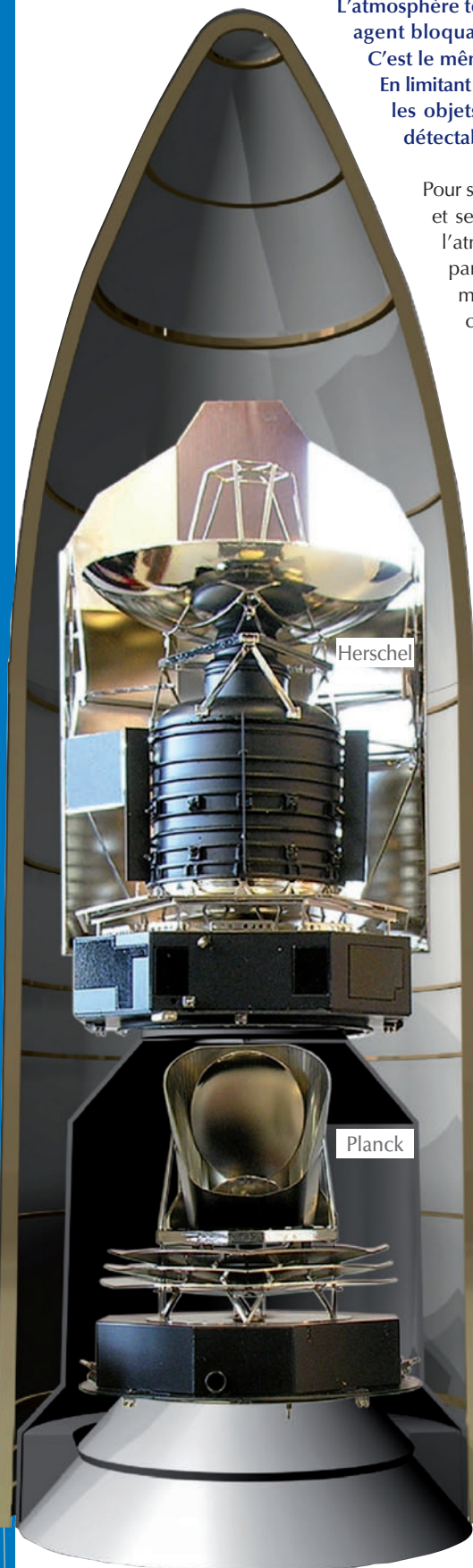
© ESA/Herschel

(c)



© ESA & the PACS Consortium

(d)



© ESA/Herschel

(b)